

Abstract (Basic): JP 9061109 A

The appts includes a source (100) that irradiates light beams with two different frequencies (ω_1 , ω_2). The beam with first frequency is led along the reference path to a mirror (183) on the object whose distance is to be measured. Part of the beam with first frequency and the beam with the second frequency are led to the mirror on the object through a polarization beam splitter.

The optical path length (D_{ω_1}) of the beam of first frequency that is led along reference part is measured. The optical path length (D_{ω_2}) of light of both first and second frequency is also measured. Based on the difference between the computed first and second optical path lengths, an arithmetic processing unit calculates the geometric distance (D) of the object based on the relation $D = D_{\omega_1} - K_{\omega_1}(D_{\omega_2} - D_{\omega_1}) / (K_{\omega_2} - K_{\omega_1})$ where functions K_{ω_1} , K_{ω_2} give the wavelength dispersion characteristic of refractive index for the two frequencies.

ADVANTAGE - Prevents reduction in measurement precision due to variation in environmental condition.

Dwg.1/9

Title Terms: OPTICAL; INTERFERENCE; MEASURE; APPARATUS; DISPLACEMENT; GAUGE ; ARITHMETIC; PROCESS; UNIT; MEASURE; GEOMETRY; DISTANCE; OBJECT; BASED; DIFFER; FIRST; SECOND; OPTICAL; PATH; LENGTH; PREDETERMINED; EQUATE

Derwent Class: S02

International Patent Class (Main): G01B-009/02

International Patent Class (Additional): G01B-011/00

File Segment: EPI

Manual Codes (EPI/S-X): S02-A03A; S02-A03B2

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-61109

(43)公開日 平成9年(1997)3月7日

(51)Int.Cl.*

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G 0 1 B 9/02
11/00

G 0 1 B 9/02
11/00

G

審査請求 未請求 請求項の数16 O L (全 13 頁)

(21)出願番号 特願平7-215579

(22)出願日 平成7年(1995)8月24日

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 新城 啓慎

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72)発明者 川上 潤

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

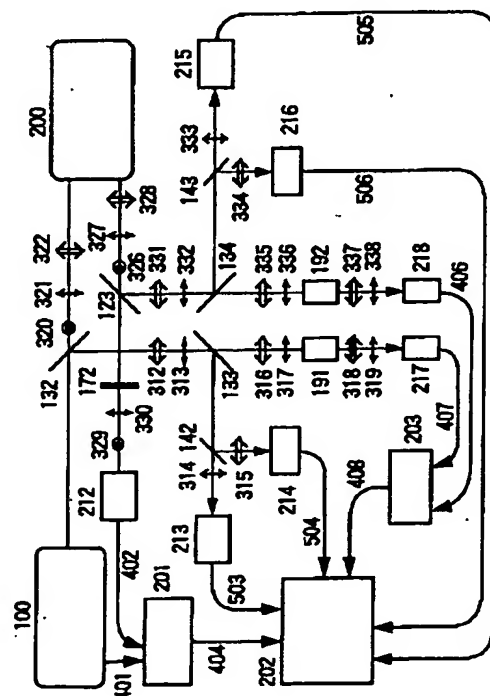
(54)【発明の名称】 光波干渉測定装置

(57)【要約】

【課題】 様々な段差に対して、固定した光学系を介して常に最良のコントラストを有する微分干渉像を得ることができない。

【解決手段】 周波数 ω_1 の第1の光と周波数 ω_2 とは異なる周波数 ω_2 の第2の光とを出射する光源部100と、第1の光の一部を参照光路に導き、第1の光の残りの光及び第2の光を測長光路に導く光分離手段124と、第1の光で測長光路に配置された測定対象物183の光路長 $D(\omega_1)$ を検出する第1光学系と、第1の光と第2の光とを用いて、第2の光で検出した場合の測定対象物183の光路長 $D(\omega_2)$ と、 $D(\omega_1)$ と、の差に相当する $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ を検出する第2光学系と、 $D(\omega_1)$ と $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ と(1)式を用いて、測定対象物の幾何学的距離Dを求める演算処理手段202とを有する。

【数1】 $D = D(\omega_1) - K(\omega_1) [D(\omega_2) - D(\omega_1)] / [K(\omega_2) - K(\omega_1)] \cdots (1)$
〔ただし、 $K(\omega)$ は屈折率の波長分散特性を表すあらかじめ求めた関数である〕



【特許請求の範囲】

【請求項1】周波数 ω_1 の第1の光と該周波数 ω_1 とは異なる周波数 ω_2 の第2の光とを射出する光源部と、前記第1の光の一部を参照光路に導き、該第1の光の残りの光及び前記第2の光を測長光路に導く光分離手段と、前記第1の光で前記測長光路に配置された測定対象物の光路長 $D(\omega_1)$ を検出する第1光学系と、前記第1の光と前記第2の光とを用いて、該第2の光で

$$D = D(\omega_1) - K(\omega_1) [D(\omega_2) - D(\omega_1)] / [K(\omega_2) - K(\omega_1)] \quad (1)$$

【ただし、 $K(\omega)$ は屈折率の波長分散特性を表すあらかじめ求めた関数である】

【請求項2】前記第1光学系は、前記参照光路を通った第1の光と前記測長光路を通った第2の光とを干渉させる第1の干渉光学系と、前記干渉した2つの光を検出する検出器と、を備えていることを特徴とする請求項1に記載の光波干渉測定装置。

【請求項3】前記第2光学系は、前記測長光路を通った第1の光と前記第2の光とを干渉させる第2の干渉光学系と、前記第2の干渉光学系によって干渉した2つの光を検出する検出器と、を備えていることを特徴とする請求項1または2に記載の光波干渉測定装置。

【請求項4】前記第2光学系は、前記第1の光と第2の光のいずれか一方の光の周波数を他方に近い周波数に変換させる周波数変換手段を備えていることを特徴とする請求項1、2または3に記載の光波干渉測定装置。

【請求項5】前記周波数 ω_1 は前記周波数 ω_2 の2倍の周波数であることを特徴とする請求項1、2、3または4に記載の光波干渉測定装置。

【請求項6】前記周波数 ω_2 は前記周波数 ω_1 の2倍の周波数であることを特徴とする請求項1、2、3または4に記載の光波干渉測定装置。

【請求項7】前記光分離手段は偏光ビームスプリッタであり、前記光源部は、直交する2つの偏光方位を有する2つの光からなる前記第1の光と、該2つの光のいずれか一方の光の偏光方位と略同一な偏光方位の第2の光とを射出することを特徴とする請求項1、2、3、4、5または6に記載の光波干渉測定装置。

【請求項8】前記光源部は前記第1の光を垂直な偏光方位を持つ2つの光に分割する偏光分割手段と、前記偏光分割手段で分割された2つの光をほぼ同軸に結合する結合手段とを順に有し、前記第1の光は該結合手段から射出されることを特徴とする請求項7に記載の光波干渉測定装置。

【請求項9】前記偏光分割手段は前記周波数 ω_1 に対応した $\lambda/2$ 波長板と、偏光ビームスプリッタと、を順に

検出した場合の前記測定対象物の光路長 $D(\omega_2)$ と、前記 $D(\omega_1)$ と、の差に相当する $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ を検出する第2光学系と、前記 $D(\omega_1)$ と前記 $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ と(1)式を用いて、前記測定対象物の幾何学的距離 D を求める演算処理手段とを有することを特徴とする光波干渉測定装置。

【数1】

有し、前記入 $\lambda/2$ 波長板を回転することにより該偏光ビームスプリッタで分割される2つの光の強度比を任意に変えられることを特徴とする請求項7に記載の光波干渉測定装置。

【請求項10】前記2つの光からなる第1の光の少なくとも一方の光を周波数シフトさせる手段を有することを特徴とする請求項7、8または9に記載の光波干渉測定装置。

【請求項11】前記第2の光と偏光方位が略同一な偏光方位の第1の光と前記第2の光との少なくとも一方の光を周波数シフトさせる手段を有することを特徴とする請求項7、8、9または10に記載の光波干渉測定装置。

【請求項12】前記参照光路は空気やその他の気体における屈折率の変動を減少させる為のカバーが設けられていることを特徴とする請求項1乃至11のいずれか一つに記載の光波干渉測定装置。

【請求項13】前記光源部から射出するそれぞれの光の射出角度の変動量を検出するための位置モニタを少なくとも1つ以上有することを特徴とする請求項1乃至12のいずれか一つに記載の光波干渉測定装置。

【請求項14】前記参照光路及び前記測長光路はそれぞれの光路を通る光を該それぞれの光路を2回通るように構成されていることを特徴とする請求項1乃至13のいずれか一つに記載の光波干渉測定装置。

【請求項15】前記偏光ビームスプリッタで分離される光の消光比を高くするように前記偏光ビームスプリッタの後ろに少なくとも1つ以上の偏光ビームスプリッタが配置されていることを特徴とする請求項7に記載の光波干渉測定装置。

【請求項16】前記参照光路は、該光路中に周波数 ω_2 の第2の光の強度を低減させる周波数フィルタが配置されていることを特徴とする請求項1乃至15のいずれか一つに記載の光波干渉測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、高精度な変位計測を行うための光波干渉測定装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、物体の長さ、変位、密度等の測定

を行うために光波を用いた干渉測定装置が使われている。しかしながら、空气中及び他の気体中で光波による干渉測定を行う場合に、温度や気圧等の測定環境の変化に起因する局所的な屈折率の変動によって測定精度が低下するという問題点がある。

【0003】このような屈折率の変動の影響を低減させるため、本発明者等は未公開ではあるが、特願平7-153420号の明細書及び図面において、屈折率の変動の影響を補正するための手段を備えた光波干渉測定装置を提案した。この光波干渉測定装置を図9を用いて簡単に説明する。図9の光波干渉測定装置は、移動鏡183の光軸方向の変位を測定するための光源102と、光路上の空気やその他の気体における屈折率 n の変動を測定するための光源101とを使用している。

【0004】光源102は周波数 ω_1 の光とそれに垂直な偏光方位を持つわずかに周波数の異なる周波数 ω_1' の光とを出射し、また、光源101は周波数 ω_1 、 ω_1' とは異なる周波数 ω_2 の光と周波数 ω_3 ($=2\omega_2$)の光を出射する。周波数 ω_2 、 ω_3 の光はダイクロイックミラー（以下、DMと称す）等の波長結合素子144でほぼ同軸にされ、さらに、波長結合素子141で3波長の光〔周波数 ω_1 (ω_1' を含む)、 ω_2 、 ω_3 の光〕はほぼ同軸に調整され偏光ビームスプリッタ（以下、PBSと称す）124に入射する。PBS124は前述の3波長の光を各々の光の偏光方位に応じて固定鏡182側の参照光路と、移動鏡183側の測長光路とに分割する。このとき、周波数 ω_1 の光だけがPBS124で反射されて参照光路へ入射し、周波数 ω_1' 、 ω_2 、 ω_3 の光はPBS124を透過し測長光路へと入射するように、光源101、102は配置されている。

【0005】尚、図9の装置は測長光路にのみ光源101からの2つの周波数の光を通して、測長光路における屈折率の変動はモニタをすることができ、参照光路における屈折率の変動はモニタをすることができない。従って、参照光路における屈折率の変動を極力抑えるようにエアチューブ400で参照光路を覆っている。

【0006】PBS124は総合の消光比をあげるためにPBS125、126を含めて3段構成になっており、また、測長の精度低下の原因となるクロストークを抑えるために周波数フィルター172が挿入されている。周波数フィルター172は周波数 ω_2 、 ω_3 の光を吸

$$D = D(\omega_1) - A[D(\omega_3) - D(\omega_2)] \cdots (2)$$

但し、 $A = K(\omega_1) / [K(\omega_3) - K(\omega_2)]$

尚、 $K(\omega_1)$ 、 $K(\omega_2)$ 、 $K(\omega_3)$ は、それぞれの周波数 ω に応じた波長分散特性を表す関数である。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述の光波干渉測定装置では測長及び屈折率の変動の測定のために3つの周波数の光を用いているため、DMやPBS

収し、周波数 ω_1 、 ω_1' の光を透過するものである。それぞれの光はPBS124、 $\lambda/4$ 板164、165、周波数フィルター172、固定鏡182、移動鏡183、コーナーキューブ181、184により、それぞれの光路を2回通過し、その後、それぞれの光はPBS124からほぼ同軸でDM等からなる波長分離素子142へ出射する。

【0007】その後、周波数 ω_1 、 ω_1' の光は波長分離素子142を透過することにより、他の周波数の光から分離されて検出器212に入射し測長信号402となる。また、光源102から出射した光は、ビームスプリッタ（以下、BSと称す）131によってその一部が反射され、BS131で反射された光は検出器211に入射し参照信号401となる。この参照信号401と、測長信号402とは位相計201に入力され、位相計201は入力された2つの信号から移動鏡の変位量 $D(\omega_1)$ を演算し、変位量 $D(\omega_1)$ に相当する変位信号404を演算器202に出力する。この時、変位量 $D(\omega_1)$ の測定はヘテロダイン法を用いている。ここで、この測定した変位量 $D(\omega_1)$ は上述の通り、空気の屈折率変動による誤差成分を含んでいる。

【0008】一方、周波数 ω_2 、 ω_3 の光は波長分離素子142を反射することにより、周波数 ω_1 、 ω_1' の光と分離された後、SHG変換素子191に入射する。周波数 ω_2 の光はSHG変換素子191によって第二高調波に変換され、周波数 ω_3 の光と干渉する。この干渉光は、検出器218に入射し、干渉信号403として位相計203に入力される。位相計203は干渉信号403から測長光路を通った周波数 ω_2 、 ω_3 の2つの周波数の光の位相差 $D(\omega_3) - D(\omega_2)$ を演算し、 $D(\omega_3) - D(\omega_2)$ に相当する位相差信号405を演算器202に出力する。この時、位相差 $D(\omega_3) - D(\omega_2)$ の測定はホモダイン法を用いており、位相差 $D(\omega_3) - D(\omega_2)$ は屈折率の変動を測定するために用いられる。

【0009】演算器202は移動鏡183の変位量 $D(\omega_1)$ に相当する変位信号404と、屈折率 n の変動による光路長の変化の測定値〔 $D(\omega_3) - D(\omega_2)$ 〕に相当する位相差信号405とを入力し、次式の演算を行うことによって真の変位量（幾何学的な距離） D を求めている。

等の光学素子の薄膜設計や光学系の設計などが非常に複雑になるという問題点があった。つまり、光学素子は、使用する光の周波数に応じて特性が異なるため、使用する光の種類が増加するほど光学素子の設計や光学系の設計が複雑になるのである。

【0011】本発明の目的は、上述のような3波長における光学系及び光学素子の設計上の複雑さを簡単にする

ことの可能な光波干渉測定装置を提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】そのため、本発明の光波干渉測定装置は、光源から出射する2つの周波数の光のうち、一方の光で被測定対象の変位測定を行い、一方の光と他方の光とを用いて屈折率の変動を測定する。従って、参照光路には光源から出射される光のうち前記一方の光のみを通し、測長光路には2つの周波数の光をともに通す。つまり、測長光路中における空気屈折率の変動のみを測定し、参照光路中における空気屈折率の変動を測定しないようにする。

【0013】

$$D(\omega_1) = n_1 D = [1 + NK(\omega_1)] D \cdots (4)$$

【0016】

$$D(\omega_2) = n_2 D = [1 + NK(\omega_2)] D \cdots (5)$$

上式の辺々を引くと、

【0017】

$$D(\omega_1) - D(\omega_2) = ND[K(\omega_1) - K(\omega_2)] \cdots (6)$$

また、(4)式より、

【0018】

【数7】

$$N = [D(\omega_1) - D] / DK(\omega_1) \cdots (7)$$

$$D = D(\omega_1) - A[D(\omega_2) - D(\omega_1)] \cdots (8)$$

ただし、 $A = K(\omega_1) / [K(\omega_2) - K(\omega_1)]$ である。ここで係数Aは空気屈折率の構成比率が変わらなければ定数と見なせることがわかる。また、(8)式の表す意味であるが、幾何学的距離Dを求めるのに、右辺第1項の周波数 ω_1 の光で測定した光路長 $D(\omega_1)$ を、右辺第2項の屈折率の分散により生じる光路長差の変化で補正していることを示す。尚、(8)式は幾何学的な距離Dのみを導き出すものではなく、(8)式中の $D(\omega_1)$ 、 $D(\omega_2)$ をそれぞれの周波数における光路長の変化として検出することにより被検物体の変位Dをも導き出すものでもある。つまり、本発明で幾何学的距離または光路長と言う場合はそれぞれの変位を含むものである。

【0020】本発明では、(8)式の $D(\omega_1)$ 及び $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ をそれぞれ検出する手段を持ち、この検出結果を(8)式により演算することで幾何学的距離Dを求めるものである。次に図面を用いて上述の $D(\omega_1)$ 及び $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ をそれぞれ検出する手段の具体的な構成等を示す実施形態を説明する。

【0021】図1は本発明の光波干渉測定装置の1つの実施形態を示す光学系の図である。光源部100は2つの周波数 ω_1 、 ω_2 の光を出射するものであり、具体的には図2に示される構成である。図2の光源101は例えばヨウ素の吸収線を利用した周波数安定化レーザーであり、内部には第二高調波変換素子等が配置されている。

【発明の実施形態】まずはじめに、本発明における測定の原理について簡単に説明する。一般に屈折率nは、Nを空気密度、 $K(\omega)$ を波長分散特性を表す関数として、

【0014】

$$[数3] \quad n = 1 + NK(\omega) \cdots (3)$$

と表される。それぞれの周波数 ω_1 、 ω_2 における屈折率を n_1 、 n_2 とし、その時の光路長をそれぞれ $D(\omega_1)$ 、 $D(\omega_2)$ とし、幾何学的距離をDとすると、(3)式を用いてそれぞれの周波数における光路長は次式により表される。

【0015】

【数4】

【数5】

【数6】

であるから、幾何学的距離Dを整理すると、

【0019】

【数8】

光源101からは周波数 ω_1 の光301（基本波：以下、FNDと称す）と、周波数 ω_1 の2倍の周波数 ω_2 を持った光302（第二高調波：以下、SHGと称す）が出射される。光源101は、具体的には、基本波（FND）の波長が1064nmで強度が200mWであり、第二高調波（SHG）の波長が532nmで強度が100mWであるものを用いた。周波数 ω_1 の光301は $\lambda/2$ 板161によりその偏光方位が自由に変えられるようになっている。 $\lambda/2$ 板161を通過した光は偏光ビームスプリッタ（PBS）121により、紙面と垂直な偏光方位（以下、s-偏光）を持つ光303と紙面と平行な偏光方位（以下、p-偏光）を持つ光304に分けられる。このとき、 $\lambda/2$ 板161を回転させることで光303と光304の強度比を適当な強度になるように調節することが好ましく、ここでは光303に対して光304の強度が約100倍となるようにした。光303及び光304は、それぞれ音響光学素子（AOM）からなる周波数シフタ112、113によりそれぞれわずかに異なった周波数シフトを受け、周波数 ω_{11} （ $=\omega_1 + \Delta\omega_1$ ）を持った光305と、周波数 ω_{12} （ $=\omega_1 + \Delta\omega_1'$ ）を持った光306となる。ここで、光303と光304との周波数に変調をかける理由はヘテロダイン法を用いて測定するためである。また、ヘテロダイン法を用いる理由は①光源の光強度の変化に強い②測定周波数の帯域制限が容易である③移動鏡183の移動方向の判別が容易である等である。特に、②の測定周波数の帯域

制限については測定周波数を測定環境の雑音レベルの大きい周波数帯域からはずすことが可能となるように、ここでは $\Delta\omega_1$ の周波数が10.1MHzとなるようにし、 $\Delta\omega_1'$ の周波数が10MHzとなるようにした。光305、306はPBS122ではほぼ同軸になるように結合され、ビームスプリッタ(BS)131で2つの偏光方位の光305、306ともに1部が反射され(光308、光309)、偏光板付きの検出器211に入力する。尚、不図示の偏光板の偏光方位は光308、309に対して45度となるように配置され、光308、309は偏光板を通過することにより干渉し、その周波数差 $\delta (= \Delta\omega_1 - \Delta\omega_1')$ に等しいビート信号が図1の測長検出装置201に参照信号401として入力される。ここで、参照信号401を得る方法としては図3に示すようにしても良い。図2では光305と光306とのビート信号を得るために2つの光の干渉光を検出器211で得ているのに対して、図3では周波数シフタ112、113を駆動するための駆動周波数の差をビート信号として取り出し、この信号を参照信号401として用いている。尚、周波数シフタ112、113を駆動する駆動周波数は、それぞれが前述の $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_1'$ に対応している。尚、図3におけるその他の構成は図2と同様であるため説明を省略する。

【0022】一方、周波数 ω_2 の光302は周波数シフタ111に入射し、 $\Delta\omega_1$ 及び $\Delta\omega_1'$ の2倍の周波数とは異なる周波数シフトを受け周波数 $\omega_{21} (= \omega_2 + \Delta\omega_2)$ を持つp-偏光の光307となる。尚、光302に対する変調も上述のヘテロダイン法を用いるためであり、 $\Delta\omega_2$ は18MHzとした。BS131を透過した光310、光311と光307は、波長結合素子141により3つの光がほぼ同軸になるように調整され、図1のPBS132に向かう。

【0023】PBS132に入射した3つの光307、310、311のうち、p-偏光の周波数 ω_{12} の光310及び周波数 ω_{21} の光307はPBS132によりその強度の約1/4を反射し(光313:周波数 ω_{12} 、光312:周波数 ω_{21})、光310、307の残りの光とs-偏光の光311は透過する(光320:周波数 ω_{11} 、光321:周波数 ω_{12} 、光322:周波数 ω_{21})。

【0024】また、このPBS132の代わりにBSを用いても良い。この時は反射光側(BS133側)にPBSを配置し、不必要なs-偏光の光をカットすれば良い。また、BSで反射される光と透過する光の比率も適当な値とすることができる。PBS132で反射した2つの光312、313はBS133でそれぞれ一部反射され、反射した2つの光はさらにDM等からなる波長分離素子142により周波数 ω_{12} の光314と周波数 ω_{21} の光315に分離され、光源101の出射光方向を検出する位置モニタ213、214にそれぞれ入射する。これは光源から出射する光の出射方向が変わると測長値も

変わるので、この位置モニタの出力を使って測長値を補正するためである。尚、位置モニタ213、214は光電変換部を備えたものであり、光電変換部に入射する光の位置を検出するものである。尚、この光源から出射する光の出射方向の変動に起因する測定値の補正方法については後述する。

【0025】BS133を透過した光316、317はSHG変換素子191に入射し、FND光である光317が波長変換され周波数 $\omega_{12}' (= 2\omega_{12})$ の光319となり、SHG変換素子191を通過したSHG光である周波数 ω_{21} の光318と干渉する。その干渉光を検出器217で測定し、検出器217は空気の屈折率変動により生じる光路長変化を測定する位相計203にその干渉光に応じたゆらぎ参照信号407を出力する。

【0026】一方、PBS132を透過した3つの光320(周波数 ω_{11})、光321(周波数 ω_{12})、光322(周波数 ω_{21})は干渉部200に入射する。この干渉部200の具体的な構成は図4に示す。光320、321、322はPBS124に入射し、s-偏光を持つ光323だけが参照光路に反射される。このとき、PBS124ではp-偏光であるSHG光は理想的には反射されないが、実際にはPBSの消光比に応じてPBS124でp-偏光の光も反射される。ここで、PBS124で反射されるp-偏光の光はFND光とSHG光とがあるが、屈折率の変動を検出するための検出器218に入射する光はSHG変換素子192を透過した光である。そして、FND光に関してはSHG変換されたもののみを測定に用いるが、本実施の形態の場合、SHG変換の変換効率が1%未満程度であるため、不必要なFND光の強度は十分に低減され、測定誤差とはなりにくい。しかし、SHG光に関しては前述のようなSHG変換が行われないため、PBS124で反射された不必要なSHG光の強度が低減されずに検出器218に入射するので、屈折率変動の測定精度に大きく影響する可能性がある。従って、PBS124で反射したわずかなSHG光はSHGカットフィルタ(周波数フィルタ)171で除去または低減される。反射したFND光323はFND用入/4板162を透過し、固定鏡182によりほぼ同軸で反射され再び入/4板162を透過する。このとき、FND光323は入/4板162を2度通過することによって、その偏光方位は90度回転するためp-偏光となってPBS124、125を透過する。その後、SHGカットフィルタ(周波数フィルタ)172を透過し、コーナーキューブ181で反射された後、再びPBS125、124を透過して参照光路に入射する。再度参照光路に入射した光323は固定鏡182で反射し、上述と同様に入/4板162を2度通過することによって、偏光方位が90度回転してs-偏光としてPBS124に戻ってくる。そして、光323はPBS124で反射され図1のPBS123へ出射する(光326)。

ここで、参照光路は屈折率の変動をモニタしないため、光路全体をエアチューブ400で覆うことにより、参照光路上で生じる局所的な屈折率変動が抑えられるように構成されている。

【0027】一方、PBS124を透過したs-偏光の光324（周波数 ω_{21} ）、光325（周波数 ω_{12} ）は、FND光とSHG光の2波長に対応する $\lambda/4$ 板163を透過し、移動鏡183で反射され、再度 $\lambda/4$ 板163を透過することによって偏光方位が90度回転してs-偏光となり、PBS124で反射される。PBS124で反射された光324、325は、PBS125、126で反射され、コーナーキューブ184に入射する。光324、325はコーナーキューブ184で反射され、再度PBS126、125、124で反射され測長光路へ入射する。測長光路に再度入射した光324、325は $\lambda/4$ 波長板163を透過した後、移動鏡183で反射され、再度、 $\lambda/4$ 波長板163を透過することによって偏光方位が90度回転してp-偏光となり、PBS124を透過する。

【0028】上述の通り、PBS124、125、126によって、参照光路及び測長光路を通る光は数回透過或いは反射されるため、1つのPBSの消光比が悪くても最終的にPBS124から出射する光326、327、328の偏光方位はPBS124が理想的な場合に近づくため測定精度を向上させることができる。上述のようにして参照光路及び測長光路をそれぞれ2回通ったそれぞれの光はほぼ同軸となりPBS123（図1）へ出射される（光326：周波数 ω_{11} 、光327：周波数 ω_{12} 、光328：周波数 ω_{21} ）。

【0029】尚、干渉部200は、図4のようにそれぞれの光が参照光路及び測長光路をそれぞれ2回通るようなダブルパスの構成に限られるわけではなく、例えば図5のようにシングルパスの構成にしても良い。図5ではPBS124によってs-偏光の光320が反射されて参照光路に入射し（光323）、p-偏光の光321、322はPBS124を透過して測長光路に入射する（光324、325）。参照光路に入射した光323は周波数フィルタ171を透過し、コーナーキューブ（固定鏡）182によって反射され、再度、周波数フィルタ171を透過し、PBS124に入射する。また、光324、325はコーナーキューブ（移動鏡）183で反射されてPBS124に入射する。PBS124に入射した3つの光はほぼ同軸となりPBS123（図1）へ出射される（光326：周波数 ω_{11} 、光327：周波数 ω_{12} 、光328：周波数 ω_{21} ）。尚、図4のようにPBSを多段にするためには、参照光路及び測長光路のそれぞれにPBSを挿入すれば図4と同様に消光比を向上させることができる。

【0030】PBS123はFND光のp-偏光に対してのみ消光比が悪くなるように設計されており、s-偏

光の光326とp-偏光のFND光327の一部の光330を透過し、透過した2つの光（光329：周波数 ω_{11} 、光330：周波数 ω_{12} ）は偏光板付きの検出器212に入射する。尚、FND光のp-偏光に対するPBS123の消光比は、光330に対して光332の強度が100倍程度となるように設計されている。ここで、周波数 ω_1 による移動鏡183の変位の測定精度低下の原因となるPBS123を透過したSHG光は、SHGカットフィルタ（周波数フィルタ）172で除去または十分に低減される。光329と光330は偏光板を通過することによって干渉し、この干渉光は検出器212で光電変換され、移動鏡の変位及び測長光路の屈折率変動の影響を受けた測長信号402として測長検出装置201に出力される。測長検出装置201はヘテロダイン法を用いて位相を測定しており、参照信号401と測長信号402のビート周波数の位相差を測定することで、測定対象物（移動鏡183）の変位を測定することができる。ここで、PBS123の光学薄膜設計が難しく製造が困難な場合は、ビームスプリッタとPBSで代用することができる。この時は図1のPBS123の位置にビームスプリッタを置き、反射側（検出器218側）に誤差光となる光326をカットするようにPBSを配置すればよい。

【0031】PBS123で反射されたp-偏光のFND光332（周波数 ω_{12} ）、SHG光331（周波数 ω_{21} ）はBS134により一部反射される。BS134で反射された2つの周波数の光はDM等からなる波長分離素子143によって、光333（周波数 ω_{12} ）、と光334（周波数 ω_{21} ）とに分離される。光333、334はそれぞれ位置モニタ215、216に入射し、位置モニタ215、216は光源の出射方向の変動を測定し、その検出信号505、506を演算器202に出力する。

【0032】また、BS134を透過した2つの周波数の光335（周波数 ω_{21} ）、光336（周波数 ω_{12} ）はSHG変換素子192に入射する。SHG変換素子192に入射した2つの光のうち光336はSHG変換素子192によってSHG変換されSHG光338（周波数 $\omega_{12}' = 2\omega_{12}$ ）となる。SHG光338（周波数 ω_{12}' ）と光337（周波数 ω_{21} ）とは干渉し、検出器218によってその干渉光が検出される。尚、不図示ではあるが、検出器217、218の前にはFND光をカットするための周波数フィルタを配置し、SHG変換素子191、192を透過した不必要なFND光を低減させている。

【0033】ところで、本実施の形態ではSHG変換素子191、192の材料としてKTPを用いているが、光317、光336の偏光方位はSHG変換されることにより偏光方位が回転する。従って、光318と光319及び光337と光338はそのままでは偏光方位が異

なるため干渉しない。そのため、これらの光を干渉させる必要があるが、その方法としては、例えば、偏光板を用いて偏光板の方位の成分同士を干渉させる方法でも良いし、複数の波長板を組み合わせて用いることにより、一方の光の偏光方位を他方の光の偏光方位に合わせて干渉させる方法を用いても良い。

【0034】上述のようにして得られたゆらぎ参照信号407とゆらぎ測定信号406は位相計203に入力される。位相計203は、ヘテロダイン法を用いてゆらぎ参照信号407とゆらぎ測定信号406とのビート周波数の位相差を測定することで、周波数 ω_{12} の光と周波数 ω_{21} の光との位相差を計算することができる。また、位相計203はこの位相差に相当する信号408を演算器202に出力する。この信号408は(8)式の $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ に相当するものである。さて、ここで前述の位置モニタ213、214、215及び216を用いて光源から出射する光の変動の影響を補正する方法について説明する。

【0035】まず、それぞれの位置モニタの構成について説明する。それぞれの位置モニタは図7(a)、(b)に示すように、レンズ501と光電変換素子502が内蔵されている。また、レンズ501と光電変換素子502とは距離dだけ離れてそれぞれが配置される。光電変換素子502は、予め設定された焦点(FP)からのビームスポットの変位($d \tan \theta_B$)を表す信号を出力する。このビームスポットは、光束が平行に移動したときはFPから動かないが、出射角度が θ_B 変化したときには、図7のように移動する。尚、光電変換素子502は、ビームスポットのx方向変位とy方向変位を測定することができるものであればどのようなものでもよく、高分解能のPSD(ポジション・センシティブ・ディテクタ)、CCDまたは4分割フォトディテクタ等を用いることが可能である。

$$\begin{aligned} (\text{曲線701}) = & a \cdot (\text{曲線711}) + b \cdot (\text{曲線712}) + c \cdot (\text{曲線721}) \\ & + d \cdot (\text{曲線722}) + kt + e \cdots (9) \end{aligned}$$

但し、tは時間である。そこで、(9)式を用いて回帰計算を行い、最適な係数a、b、c、dを予め求めておき、演算器202は、これらの係数a、b、c、dを用いて(10)式の如く計算を行い、光束の出射角度の変

$$\begin{aligned} (\text{曲線702}) = & (\text{曲線701}) - [a \cdot (\text{曲線711}) + b \cdot (\text{曲線712}) \\ & + c \cdot (\text{曲線721}) + d \cdot (\text{曲線722})] \cdots (10) \end{aligned}$$

尚、本実施の形態では実際に生じている屈折率変動を時間の経過にして直線的な変化であると仮定しているが、その直線的な変化を曲線701の1次近似直線とした場合、この近似直線と曲線701との差分の標準偏差は0.85mradであった。一方、近似直線と曲線702との差分の標準偏差は、0.28mradとなり、これは本補正が有効であることを示している。

【0041】尚、光束の出射角度を検出する位置については必ずしも光源の直後とする必要はなく、移動鏡18

【0036】さて、光の変動を補正する具体的な説明をする。ここでは、位置モニタ213、214からの検出信号503、504を用いて、屈折率変動の信号408に含まれる測定誤差に対する補正演算を行っている。また、補正演算で用いる補正情報は回帰分析によって算出した。図8(b)の曲線711および曲線712は位置モニタ213から出力された検出信号503が示すビームスポットのx方向変位およびy方向変位成分であり、周波数 ω_{12} の光束の出射角度の水平方向成分および垂直方向成分に相当する。

【0037】同様に、同図の曲線721、722は位置モニタ214から出力された検出信号504が示すビームスポットのx方向変位およびy方向変位成分であり、周波数 ω_{21} の光束の出射角度の水平方向成分および垂直方向成分に相当する。また、図8(a)の曲線701は全光路において局所的な屈折率変動が極力発生しないように、エアチューブ400に代えて、全光路が覆われるカバー(不図示)を設けて測定を行ったときの位相計203からの信号408である。また、曲線701の測定時間は同図のように短時間で行われているので、このときの気体の屈折率変動は光路全体に一樣に発生する温度変化、気圧変化にしたがって変化するものと考えられる。すなわち、この屈折率変動は、ある傾きをもった直線によって表されるはずである。

【0038】しかし、実際には曲線701のように小さな変動成分が生じてしまう。この変動成分は光源から出射する光束の出射角度の変動によるものと考えられる。従って、曲線701は(9)式に示すように、光束の出射角度の変動情報を示す曲線711、712、721、722の定数倍と、一定の屈折率変動を表す直線($kt + e$)との合成によって表すことができる。

【0039】

【数9】

動による測定誤差が低減された測定値(図8(a)の曲線702)を算出している。

【0040】

【数10】

3の移動に伴う振動が伝わりにくい場所であれば基本的にはどこでも構わない。例えば、図1の位置モニタ215、216のような場所で検出してもよい。このような位置で光束の出射角度に関する情報を得れば2つの周波数の光が光路を通過する間に発生する当該2つの光の角度変動についても補正を行うことができる。また、光束の出射角度の検出は一か所の出力のみを用いるのではなく、図1のように複数の場所に位置モニタを設置し、複数の場所からの出力を補正に用いても構わない。

【0042】以上のようにして演算器202は、測長検出装置201からの測長値(変位信号404)を、屈折率変動測定位相計203の測定値(信号408)及び位置モニタ213、214、215、216の光束の出射角度の値(検出信号503、504、505、506)を用いて演算処理し補正することで、移動鏡183の幾何学的変位を高精度で求めることができる。

【0043】ところで、上述の2つの周波数を用いた屈折率の変動の検出は測長光路のみ行うことが望ましいが、図1では2つの周波数の光は光源からPBS124に入射するまでの間及びPBS124から検出器218に入射するまでの間の光路においても屈折率の変動があるとその屈折率変動についても検出してしまふ。従って、測長光路上以外で受ける余分な屈折率変動の影響を極力抑えるために、測長光路以外の光路をエアチューブ等で覆うことが好ましい。また、エアチューブ内を減圧し、エアチューブ内の屈折率の変動を低減させることによって、更に測定精度を向上させても良い。

【0044】ところで、本実施の形態では2つの周波数の光(FND光とSHG光)のうちFND光を用いて移動鏡183の変位($D(\omega_1)$)を測定しているが理論的にはFND光とSHG光を逆にしてSHG光で移動鏡183の変位を測定しても構わない。しかし、FND光で移動鏡183の変位を測定する方が最終的に検出器で測定される屈折率変動に生じる測定誤差が少ないためFND光を用いることが好ましい。例えば、FND光を用いた場合は、PBS124に入射する光321と光322が最終的に検出器218に到達することになるが、前述のようにPBS124の消光比が理論的ではないため、参照光路にもこれらの光は入射する。ここで、SHG光は周波数フィルタ171、172によって十分に低減させることができるが、FND光はPBS124、125の消光比によってはかなりの強度が残る可能性がある。しかし、この誤差要因となるFND光はSHG変換素子192によってSHG変換されることによってその強度が十分に低減されるため屈折率変動測定の精度に重大な影響を及ぼさないのである。これは、SHG変換素子によって変換されるSHG光の強度はSHG変換素子に入射するFND光の強度の2乗に比例し、その変換効率はたかだか1%程度であるという理由からである。しかし、移動鏡183の変位測定にSHG光を用いた場合、前述のPBS124の消光比の問題で参照光路に入射した2つの光のうち周波数フィルタによってその強度を低減させることのできる光はFND光のみである。従って、PBS124、125によって誤差要因となるSHG光が十分に低減されないと、SHG光はSHG変換素子192を通っても前述のFND光のようにSHG変換されずにそのまま透過するため屈折率変動の測定精度に影響を及ぼす可能性がある。

【0045】また、(8)式における $D(\omega_1)$ 及び

$[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ はそれぞれ位相計201、203から出力される信号に相当するが、位相計201で求められる $D(\omega_1)$ と位相計203で求められる D

(ω_1)は測定の方法が異なる(位相計203の信号は参照光路に関する情報は含まない)。しかし、上述のように参照光路はエアチューブ400で覆われており、更に、参照光路を短くする等によって参照光路における屈折率変動は無視することができるため、測長光路における2つの光の位相差を測定すれば、 $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ を求めることと同等となる。

【0046】以上のように、本実施の形態では図9に比べて光源を1つにすることができるため、コストを低減することができ、さらに、そのスペースを省略できるため光波干渉測定装置自体も小型化することができた。また、2つの周波数の光しか使わないため、干渉計に使用する波長結合素子やその他の光学素子も2つの周波数の光に対応したもので良く、光学系の設計及び光学素子の設計上の複雑さが簡単になった。

【0047】尚、本実施の形態ではPBS121、123、133、BS131、PBS132、133、134によってそれぞれ分離される光の分離比を上述のように設定しているが、この分離比は、光源101のFND光及びSHG光の強度、SHG変換素子191、192の変換効率、検出器211、212、217、218等の光検出感度および各光学素子の光学的損失等を考慮して決定することが好ましい。特に、SHG変換素子191、192の変換効率は上述のように1%未満程度であるため、検出器211、212に入射する光の強度は最低限必要な強度にして、残りの光は屈折率の変動を測定するために用いることが好ましい。また、光検出器211、212に入射するp-偏光の光とs-偏光の光の強度が同程度となるように設計することが好ましい。図6は、本発明の光波干渉測定装置の他の実施形態を示す概略構成図である。

【0048】図6の装置は先の実施の形態で説明した装置と比べて、(8)式の $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ を測定する方法にホモダイン法を用いている以外は基本的な構成は同じである。従って、同様なものには同じ符号を付して説明は省略する。光源101からFND光301とSHG光302が出射する。光301は図2と同様に入/2波長板161とPBS121によって光303と光304とに分離される。光303は図2と同様に周波数シフタ112によって周波数変調を受けた光305となる。また、光304は周波数変調を受けずにPBS131で光305と同軸で出射される。その後、光304、305はBS122によって一部が反射され(光308、309)、BS122によって反射された光308、309は不図示の偏光板を通過することにより干渉する。この干渉光は検出器211で検出され図1の装置と同様に参照信号401として位相計201に出力され

る。一方、BS122を透過した2つの光は波長結合素子141で光302と結合され、3つの光は同軸で出射される(光320、321、322)。PBS124に入射した3つの光については先の実施の形態で説明した図5の干渉部200と同様に参照光路と測長光路に分離され、その後、PBS124から同軸で出射する(光326、327、328)。光326、327、328は図1と同様にPBS123により、光326と光327の一部が反射され、周波数フィルタ172を透過する。周波数フィルタ172を透過した光329、330は不図示の偏光板を透過することによって干渉し、この干渉光は光検出器212によって検出される。光検出器212によって検出された干渉光は測長信号402として位相計201に出力される。位相計201は図1と同様にヘテロダイン法を用いて参照信号401と測長信号402とから移動鏡183の変位を測定し、その変位信号404を演算器202に出力する。

【0049】一方、PBS123を透過した2つの光331、332はBS134によって一部が反射され、BS134で反射された2つの光のうちFND光336はSHG変換素子192でSHG光に変換され(光338)、SHG変換素子を透過したSHG光337と干渉する。この干渉光は検出器218で検出され、ゆらぎ測定信号409として演算器202に出力される。一方、BS134を透過した2つの光は波長分離素子143によってそれぞれの周波数の光333、334に分離される。光333、334はそれぞれ位置モニタ215、216に入射し、図1の装置と同様に光束の出射方向の変動を検出される。位置モニタは光333、334の情報を検出信号505、506として演算器202に出力する。演算器202は、位相計201から出力される変位信号404、検出器218から出力されるゆらぎ測定信号409及び位置モニタ215、216から出力される検出信号505、506から図1の装置と同様に移動鏡183の真の変位Dを演算する。

【0050】ところで、検出器218から出力されるゆらぎ測定信号409のみからは、屈折率の変動量を求めることはできるが、その変動の方向を判別することができない。つまり、(8)式の $[D(\omega_2) - D(\omega_1)]$ の絶対値を求めることはできるが、 $D(\omega_1)$ に対して $D(\omega_2)$ が小さいのか大きいのかを判別することができない。そこで、変動の方向を判別したい場合は信号402に対して90度位相がずれた信号を得る必要がある。その方法としては、一般的に知られているが、例えば、検出器218内において、入射する干渉光を2つの干渉光に強度分割し、その分割された干渉光の一方に対して他方の干渉光の位相を90度ずらして検出し、その2つの干渉光によって得られた2つの信号から方向を判別すれば良い。尚、このように一方の干渉光に対して他方の干渉光の位相を90度ずらすためには、波長板や偏

光素子等が用いられる。また、波長変換素子192に入射する2つの周波数の光のどちらか一方の周波数の光路長をある周波数fで変調させ、演算器202の中で周波数fに基づいて同期検波を行うことによって90度位相のずれた2つの信号を得ることができ、同様に変動の方向を判別することができる。

【0051】また、図6の装置は図1の装置と同様に、測長光路のみの屈折率変動を検出することが好ましい。そのため、測長光路以外の光路はエアチューブ等で覆うことが好ましい。また、PBS124に入射する3つの光のうち、光320、321の一部を取り出し、更に、光321をSHG変換することによって光320と光321を干渉させ、この干渉光を屈折率変動の参照信号として用いることは好ましい。つまり、この参照信号を得ることによって、PBS124に入射する前の屈折率変動の情報を得ることができ、この情報を用いて検出器218で検出されるゆらぎ測定信号409の測定値からPBS124の前に起因する屈折率の変動を除去することができるので、より正確に測長光路の屈折率の変動を検出することができる。

【0052】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の装置は、屈折率変動を測定する光を用いて測定対象物の変位も測定するため、3波長における光学系及び光学素子の設計上の複雑さを簡単にすることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光波干渉測定装置の1つの実施の形態を示す概略構成図である。

【図2】実施の形態の光源部100を示す概略構成図である。

【図3】実施の形態の光源部100を示す概略構成図である。

【図4】実施の形態の干渉部200を示す概略構成図である。

【図5】実施の形態の干渉部200を示す概略構成図である。

【図6】本発明の光波干渉測定装置の他の実施の形態を示す概略構成図である。

【図7】実施の形態の位置モニタを示す概略構成図である。

【図8】図8(a)：図1の装置で得られた位相計203の測定値と補正後の測定値を示すグラフである。

図8(b)：図1の装置の位置モニタで得られた各光束の変位を表すグラフである。

【図9】光波干渉測定装置を示す概略構成図である。

【符号の説明】

100：光源部

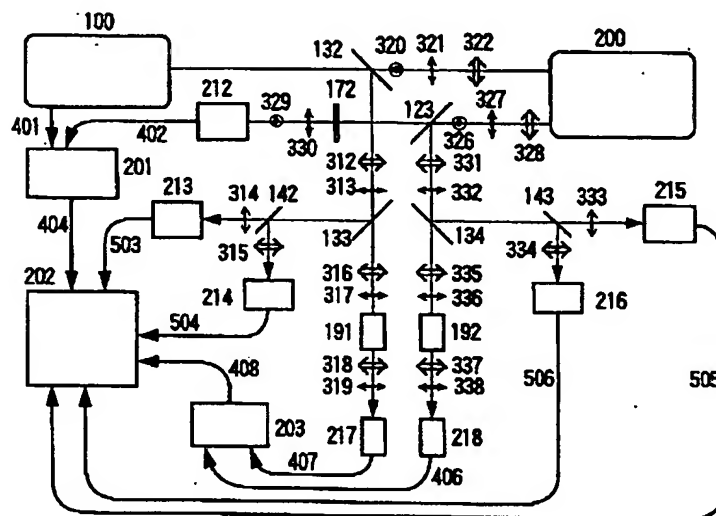
101：2波長光光源

102：測長用光源

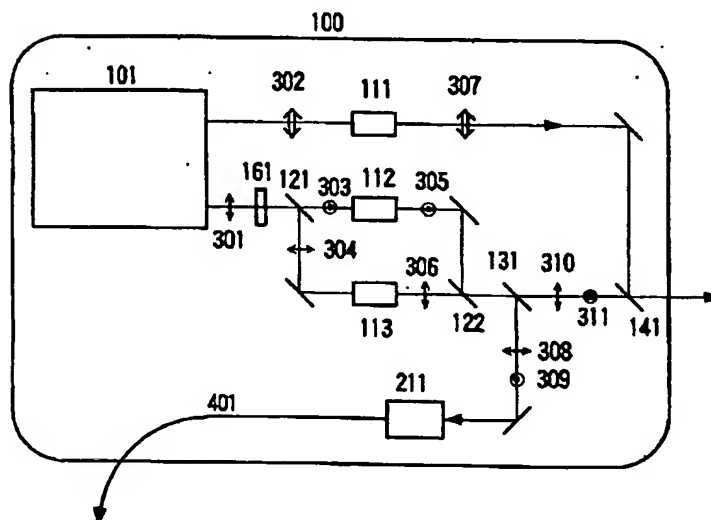
111、112、113：周波数シフタ

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 121、122、123、124、132: 偏光ビーム | 182: 固定鏡 |
| スプリッタ | 183: 移動鏡 |
| 131、133、134: ビームスプリッタ | 191、192: 第2高調波変換素子 |
| 141、144: 波長結合素子 | 200: 干渉部 |
| 142、143: 波長分離素子 | 201: (測長用)位相計 |
| 161: 1/2波長板(FND用) | 202: 演算器 |
| 162、163: 1/4波長板(2波長対応) | 203: (屈折率変動測定用)位相計 |
| 164: 1/4波長板(3波長対応) | 204: 周波数シフトドライバ |
| 165: 1/4波長板(FND用) | 211、212、217、218: 光検出器 |
| 171、172: 周波数フィルター | 213、214、215、216: 位置モニタ |
| 181、184: コーナーキューブ | 400: エアチューブ |

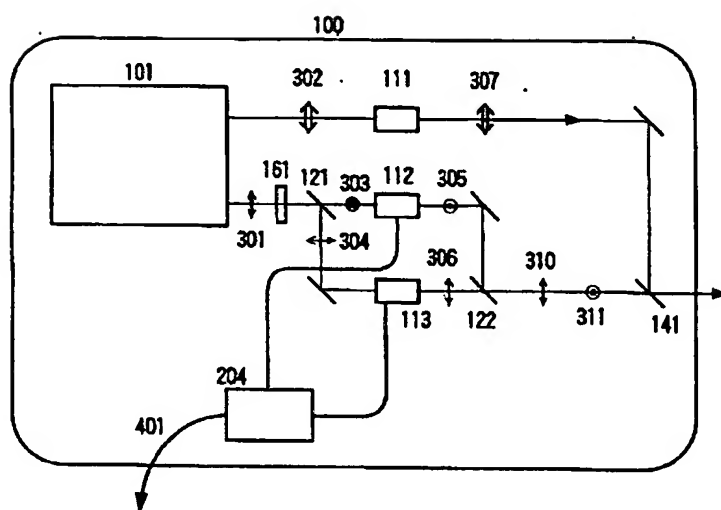
【図1】



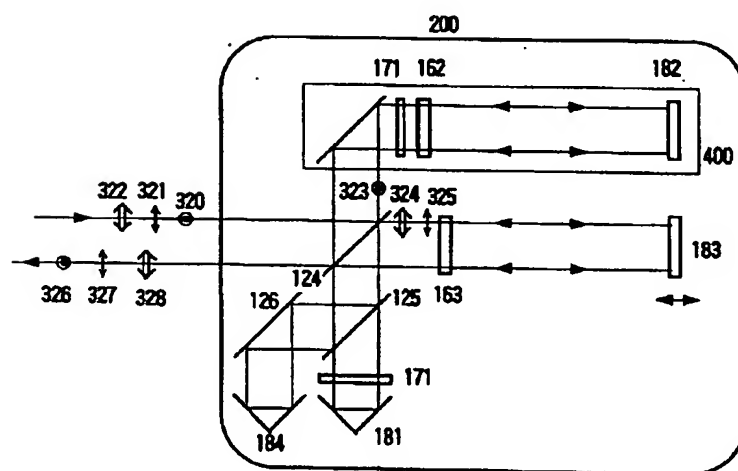
【図2】



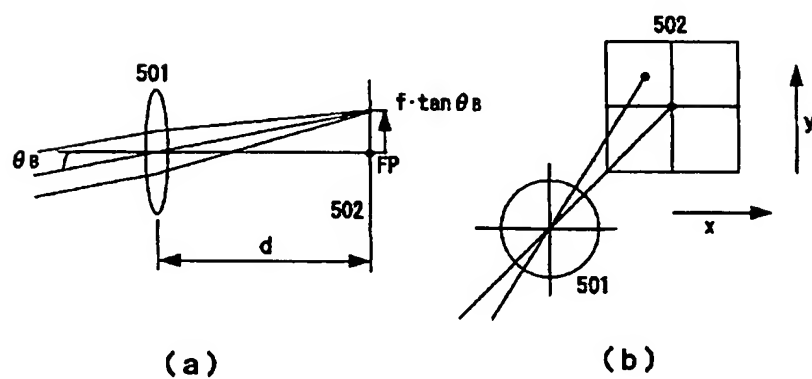
【図3】



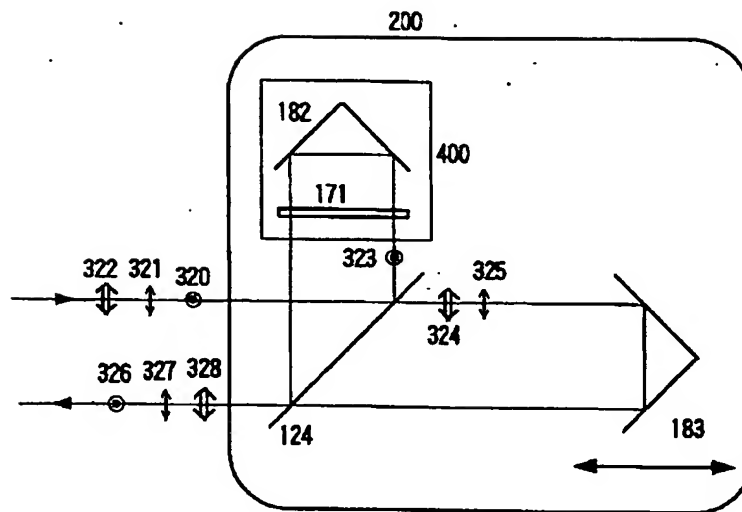
【図4】



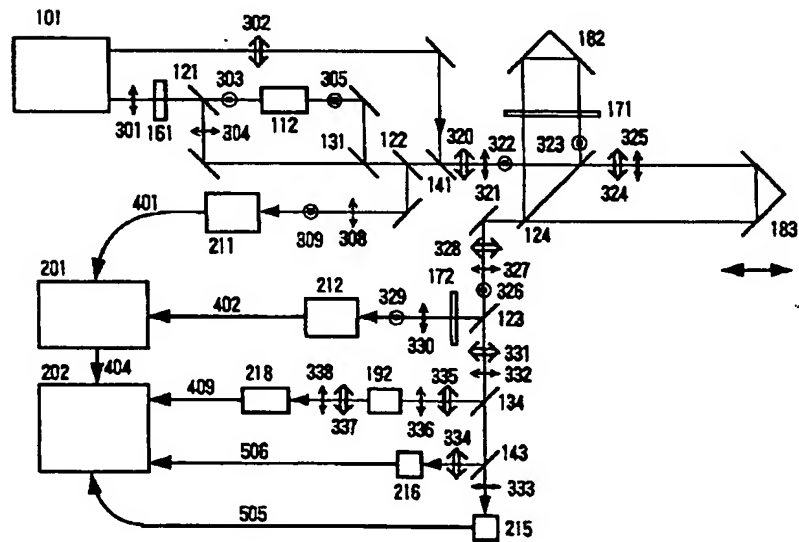
【図7】



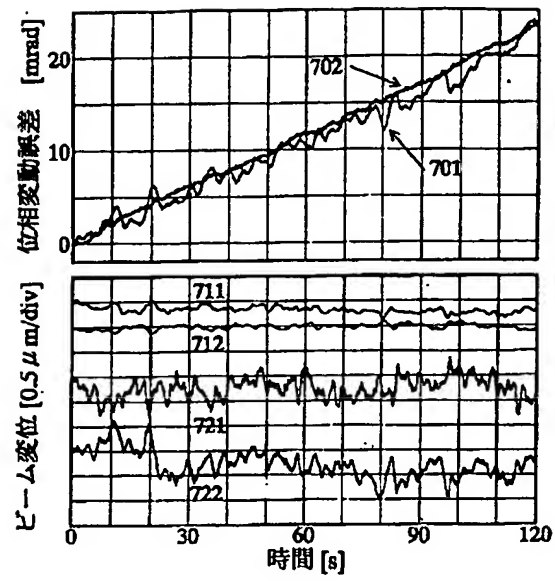
【図5】



【図6】



【図8】



【図9】

